

# TRANSPORTASI SEDIMEN OLEH KOMBINASI ALIRAN PERMANEN BERATURAN DAN GELOMBANG SERAGAM

Sunardi Widjojo JB<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret,  
Jl.Ir.Sutami No. 36 A Surakarta 57126, email: sunardi57772@yahoo.com.

## Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk mencari persamaan paling tepat untuk menghitung angkutan sedimen yang disebabkan oleh kombinasi antara aliran permanen beraturan dan gelombang seragam. Penelitian dilakukan di dalam *flume*, menggunakan aliran sirkulasi searah serta gelombang searah aliran. Bahan sedimen berupa pasir alam lepas berdiameter seragam yaitu : 0,3; 0,425 dan 0,85 mm, dengan *shape faktor*  $< 1$ . Analisis data dilakukan untuk membuat plot pembandingan terhadap garis teori Madsen dan Grant. Dalam penelitian ini faktor gesekan Jonsson dan Tanaka Shuto digunakan untuk menganalisis dua faktor data pengamatan. Hasil analisis dengan dua macam faktor gesekan diplot menjadi grafik tak berdimensi, dengan parameter Shields pada sumbu horisontal dan intensitas angkutan sedimen pada sumbu vertikal. Analisis dan plotting juga dilakukan terhadap formula Madsen dan Grant yang telah dimodifikasi. Dari kedua teori tersebut dipilih plot yang paling sesuai dengan garis-garis teori Madsen dan Grant. Persamaan empiris paling baik diperoleh dari plot yang dibuat berdasarkan teori Madsen dan Grant yang telah dimodifikasi, dengan faktor gesekan Tanaka-Shuto.

**Kata kunci :** Aliran permanen beraturan, gelombang seragam, transportasi sedimen

## Abstract

*The aim of this research is to find the suitable formula for sediment transport generated by combining unidirectional steady uniform flow and regular waves. The experiment is carried out in a small flume by using circulated steady uniform flow and regular waves. The specimens are made of a non-cohesive natural sand size of 0.3, 0.425 and 0.85 mm respectively and shape factor  $< 1$ . Result of analysis are used to make non-dimensional plots to compare with the theoretical line of Madsen and Grant. Friction coefficients of Jonsson and Tanaka-Shuto are used in the data analysis. The non-dimensional plots consist of shields parameter and intensity of sediment transport. The modified Madsen and Grant formula is also analysed and plotted. The most suitable plot to the theory of Madsen and Grant is selected. The research found that the best empirical formula is given by the modified Madsen and Grant formula with friction coefficient of Tanaka-Shuto.*

**Keywords :** Sediment transport, steady uniform flow, regular waves.

## 1. PENDAHULUAN

Transportasi sedimen di pantai dapat terjadi, di sebabkan oleh gelombang, arus laut atau kombinasi keduanya. Suatu pantai akan mengalami erosi atau sedimentasi tergantung pada kesetimbangan sedimen yang masuk dan keluar di pantai tersebut. Laju transportasi sedimen di daerah pantai antara lain di pengaruhi karakteristik sedimen, kemiringan pantai, besarnya gelombang dan arus. Gelombang laut yang berperan pada transportasi sedimen adalah gelombang pendek yang di bangkitkan oleh angin, gelombang ini di daerah dangkal akan pecah dan menimbulkan arus. Mekanisme ini terjadi terus menerus dan menjadi penyebab transportasi sedimen baik tegak maupun sepanjang pantai. Gelombang dapat menyebabkan aliran bolak-balik (*oscillatory flow*) yang pada dasarnya adalah aliran tidak tetap (*unsteady flow*). Transportasi sedimen di muara sungai di sebabkan oleh arus pasang surut gelombang dan arus sungai air tawar. Aliran oleh gelombang ini membedakan mekanisme transportasi sedimen di pantai dengan di sungai [1]. Kebanyakan teori transportasi sedimen didasarkan pada teori Shields

(1936), yang membandingkan gaya pendorong dan gaya kritis butiran. Bila gaya pendorong lebih besar dari gaya kritis (gaya tahan terhadap aliran dari individu butiran ) akan terjadi transportasi sedimen. Laju transportasi partikel berhubungan dengan gaya angkat (*lift force*) yang bekerja pada partikel tersebut. Apabila gaya angkat lebih besar daripada berat terendam (*immersed weight*) maka akan terjadi transportasi sedimen. Konsep ini di kenal sebagai konsep Statistik dan dipakai dasar teori formula transportasi sedimen oleh aliran searah. Bagnold [2], melakukan pendekatan berbeda pada kajiannya, ia menemukan laju transportasi sedimen berhubungan erat dengan energi (*power*) fluida yang ditimbulkan oleh gerak fluida disekitar dasar saluran (*power model*). Jumlah partikel yang bergerak berhubungan dengan tegangan geser dasar (*bottom shear stress*), dan partikel bergerak dengan kecepatan tertentu sesuai dengan besar alirannya. Sebagian besar formula laju transportasi sedimen dibangun berdasarkan pada power model Bagnold tersebut. Madsen dan Grant [3], mengajukan sebuah formula empiris untuk menghitung laju transportasi sedimen pada aliran

osilasi (*oscilatory flow*) murni yang dikembangkan berdasar teori Einstein untuk aliran searah permanen.

Madsen dan Grant menganggap aliran osilasi oleh gelombang merupakan aliran yang seolah-olah permanen (*quasi steady*).

Penelitian ini bermaksud menyelidiki transportasi sedimen oleh kombinasi aliran searah dan gelombang terhadap sedimen lepas (*non cohesive sediment*), berdiameter seragam. Penelitian ini ingin mencari persamaan empiris terbaik untuk menghitung transportasi sedimen yang di pengaruhi kombinasi aliran searah dan gelombang monokromatik. Dengan memodifikasi formula Madsen dan Grant dalam Harikawa[1] setelah memplot hasil analisis data pengamatan dan membandingkan dengan grafik Madsen dan Grant tsb. Analisis transportasi sedimen dilakukan dengan memakai teori faktor gesekan yang paling cocok diantara faktor gesekan Jonsson [4] dan Tanaka Shuto[5].

Penelitian dilakukan di dalam *flume* (talang air) kecil berukuran 7.8 cm x 20 cm x 500 cm, aliran dianggap tetap dan seragam, gelombang dibangkitkan oleh *wave generator* dan dianggap monokromatik, pengaruh refleksi gelombang diabaikan, butiran sedimen *non cohesive* dengan diameter 0.30 mm, 0.425 mm, dan 0.85 mm, pengamatan dilakukan 3 hingga 5 menit semenjak adanya transportasi sedimen di dasar *flume*.

## 2. LANDASAN TEORI

### 2.1. Aliran Seragam .

Aliran dianggap seragam apabila kecepatan tidak berubah terhadap ruang, baik besar dan arahnya[6].

Rumus transportasi sedimen pada umumnya di turunkan dari rumus distribusi tegangan geser dan kecepatan aliran.

### 2.2. Gelombang Monokromatik.

Gelombang monokromatik adalah gelombang yang mempunyai tinggi panjang dan cepat rambat yang konstan selama penjarannya. Gelombang ini jarang dijumpai di alam karena gelombang yang ada biasanya kompleks, tidak linier, tiga dimensi, bentuk random, untuk pendekatan dipakai teori gelombang amplitudo kecil (*airy*), yang diturunkan berdasar persamaan Laplace untuk aliran tidak rotasi (*irrotational flow*) dengan kondisi batas muka air dan dasar laut. Kondisi batas di permukaan air didapat dengan melinierkan persamaan Bermoulli untuk aliran tidak mantap. [7].

Stokes mengembangkan teori gelombang orde kedua untuk tinggi gelombang kecil.

Panjang gelombang :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi H}{L} \quad (1)$$

Kecepatan rambat :

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi H}{L} \quad (2)$$

dengan :

T = periode gelombang

H = tinggi gelombang

Kecepatan yang berperan pada transportasi sedimen adalah kecepatan di dekat dasar sebagai berikut :

$$U_b = \frac{\pi H}{T \sinh kH} + 3/4 (\pi H / L)^2 C / \sinh^4 kH \quad (3)$$

dengan:

k =  $2\pi / L$  = angka gelombang

### 2.3. Sifat Fisik Sedimen.

Sifat fisik sedimen akan menentukan sifat transportasi sedimen. Hal yang mempengaruhi sifat fisik sedimen adalah ukuran partikel, bentuk partikel, rapat massa parasitas, dan kecepatan mengendap terkait ukuran (D) butiran rapat massa ( $\rho$ ), bentuk partikel didapat faktor bentuk sebagai berikut :

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \dots (-2.8)c \quad (4)$$

a, b, c, sumbu terpendek, menengah dan terpanjang.

Kecepatan endap:

$$W = \left[ \frac{4}{3} \frac{gD}{CD} \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \quad (5)$$

dengan CD = koef. hambatan.

### 2.4. Mekanisme Transportasi Sedimen Pada Aliran Osilasi.

Tegangan geser karena gelombang. Partikel butiran di laut dalam tidak di pengaruhi oleh gerak gelombang tetapi pada laut dangkal partikel akan bergerak maju atau mundur secara periodik [7]. Hubungan tegangan geser dengan kecepatan partikel adalah sebagai berikut :

$$T_b = \rho U_*^2 \quad (6)$$

$$U_* = (0.5.f)^{0.5} U_b \quad (7)$$

dengan

T<sub>b</sub> = tegangan geser di dasar.

f = faktor gesekan.

Faktor geser karena gelombang dan arus. Di alam, kejadian gelombang dan aliran akan berinteraksi satu sama lain, di *surf zone* setelah gelombang pecah, gelombang dan aliran bersamaan menjalar ke pantai. Penjalaran gelombang searah dengan aliran akan menurunkan puncak gelombang, apabila gelombang bersuperposisi dengan aliran akan menimbulkan tegangan pada dasar yang berbeda dibanding apabila hanya terjadi gelombang atau arus saja [8]. Jonsson [4], memberikan rumus tegangan geser di dasar pada kombinasi gelombang dan arus sebagai berikut :

$$\tau_{wc} = 0,5 \rho f_{wc} (U + Ub \cos \sigma)^2 \quad (8)$$

dengan.

$$f_{wc} = (Ub f_w + U f_c) / (Ub + U)$$

Sesuai Tanaka dan Shuto [5]  $f_{cw}$  di rumuskan sebagai berikut :

$$(0,5 f_{wc})^{0,5} = \frac{0,4}{\ln(h/y)} \cdot U / Ub + \quad (9)$$

$$0,4 / \pi \{0,25 + 101(\sigma / Ub - 0,5 \ln f_{cw} + 2,42)^2\}^{0,5}$$

$$\text{dengan } y = \frac{0,111 v}{Ub(0,5 f_{wc})^{0,5}}$$

Permulaan gerak butiran sedimen. Koefisien gesekan  $f$  tergantung pada sifat sedimen pada dasar dari percobaan mengenai pengaruh gelombang terhadap awal gerak sedimen non kohesif, diperoleh hubungan  $D$  dan  $Re$  berupa grafik linier.

$$Re = U \cdot D / \nu \quad (10)$$

Transportasi sedimen pada aliran osilasi, banyaknya transportasi sedimen setiap satuan lebar ; dalam volume.

$$k_s = k_1 k_2 \quad (11)$$

Bila dinyatakan dalam berat.

$$Q_s = k_3 = \frac{T_b \mu_b}{(\rho_s - \rho) g} \quad (12)$$

Intensitas transportasi sedimen dapat dinyatakan dalam bentuk tak berdimensi dengan cara membandingkan transportasi sedimen dengan kecepatan endap butiran. Bila digunakan parameter tak berdimensi Shields yaitu:

$$\psi = Ub^2 / (\Delta g d) \quad (13)$$

dengan

$$\Delta = (\rho_s - \rho) g d \quad (14)$$

Maka intensitas transportasi sedimen dapat di rumuskan :

$$\phi = \frac{Q_s}{WD} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot k_3 \cdot \left( \frac{CD}{f} \right)^{1/2} \Psi^{3/2} \quad (15)$$

Karena  $k_1, k_2, k_3$  suatu konstanta maka rumus diatas dapat ditulis menjadi

$$\phi = k \cdot \psi^{3/2} \quad (16)$$

Sesuai penelitian Madsen dan Grant [3] laju transportasi sedimen di rumuskan sebagai berikut :

$$\phi = 12,5 \psi^3 \quad (17)$$

$$\Psi = \frac{f_w \mu_b^2}{2 \Delta g D} \quad (18)$$

Madsen dan Grant membuat analogi bahwa resultance kecepatan akibat kombinasi antara gelombang dan arus mirip aliran osilasi murni oleh sebab itu parameter Shields dapat di ekspresikan sebagai berikut :

$$\psi = f_{cw} U^2 / (2 \Delta g d) \quad (19)$$

dengan :

$U$  = resultan dari kecepatan rerata akibat arus dan osilasi didekat dasar.

Kedua persamaan tersebut di atas merupakan persamaan pokok yang akan dibahas pada penelitian ini. Hubungan kedua persamaan tersebut akan digunakan sebagai bahan verifikasi formula Madsen dan Grant dan mencari persamaan empiris yang paling cocok untuk kondisi sedimen yang ada.

### 3. METODE PENELITIAN.

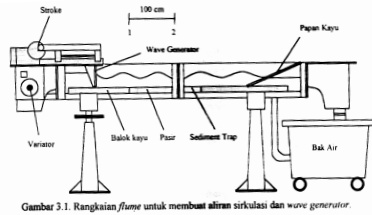
Penelitian ini dilaksanakan di laboratorium Hidrolik FT UNS. Bahan sedimen dilakukan proses pengayakan dengan 1 set ayakan sehingga didapatkan butiran seragam dengan diameter 0,30 mm, 0,425 mm, dan 0,85 mm. Disamping itu dilakukan uji berat jenis (*specific gravity*) sedimen.

Penelitian utama digunakan *flume* ukuran lebar 7,8 cm, tinggi 24 cm dan panjang 500 cm serta dilengkapi *wave generator*.

Untuk membuat aliran searah papan *wave generator* diganti papan berlubang yang lubangnya diatur sedemikian sehingga prinsip kontinuitas aliran tetap berlaku dan gelombang tetap dapat dibangkitkan. Di Gambar 1 disajikan gambar *flume* yang dimaksud.

Perlengkapan *flume* adalah pompa air untuk sirkulasi dengan kapasitas 350 l/menit, alat ukur debit, bak

tradon air, alat pembangkit gelombang (*wave generator*), dioperasikan dengan *stroke* 1 sampai 5 dan variator 1 sampai 10 *stroke* dan variator merupakan variable yang berpengaruh langsung pada karakter gelombang bangkitan yang dihasilkan.



Gambar 3.1. Rangkaian flume untuk membuat aliran sirkulasi dan wave generator.

Gambar 1. Rangkaian flume untuk membuat aliran sirkulasi dan wave generator

Perlengkapan yang lain adalah *sedimen trap* (untuk menampung sedimen yang terangkut), *point gauge*, untuk mengukur kedalaman air dan tinggi gelombang, balok kayu, *stop watch* dan *mini tetrapod* untuk mediator refleksi gelombang.

Penelitian terdiri dari tiga tahap yaitu : penyiapan bahan sedimen, pengukuran berat jenis sedimen dan pengujian transportasi sedimen di dalam flume. Tahap 1, dilakukan pengayakan dengan satu set ayakan dan dipilih butiran yang seragam untuk diameter 0,30 mm, 0,425 mm dan 0,85 mm. Tahap ke 2, melakukan uji berat jenis dengan mengambil 2 sample setiap diameter butiran yang dipakai. Tahap ke 3, mempersiapkan peralatan flume dengan wave genertor sedimen trap, sedimen yang akan diuji transportasinya. Setelah semua siap baru pompa dihidupkan, dan ditunggu agar aliran stabil. Bila butiran sedimen belum bergerak maka kemiringan dasar flume diubah sedikit demi sedikit sampai butiran mulai bergerak, kemudian ukur kedalaman air merata di 2 titik.

Hidupkan *wave genertor* dan atur posisi variator sampai timbul gelombang monokromatik dengan tinggi gelombang yang cukup besar. Geser *sedimen trap* ke hilir dan hidupkan *stop watch* untuk mengukur lama waktu terjadinya *sediment transport*, kemudian ukur parameter gelombang yaitu periode, tinggi, kecepatan rambat dan panjang gelombang dilakukan tiga kali untuk kecermatan pengukuran, selanjutnya adalah pengukuran debit. Terakhir, pengeringan dan penimbangan berat sedimen yang terangkut. Langkah tersebut diulangi untuk variasi debit kemiringan flume dan butiran yang lain.

Pada data penelitian ini dipisahkan variabel bebas dan variabel terikat (tak bebas), Variable bebas adalah kedalaman air, kecepatan aliran, tinggi gelombang, periode gelombang, cepat rambat gelombang, dan parameter diameter dan berat jenis butiran sedimen, sedangkan variabel terikat ialah laju sedimen

transport, seluruh data adalah data primer dari hasil pengukuran di laboratorium.

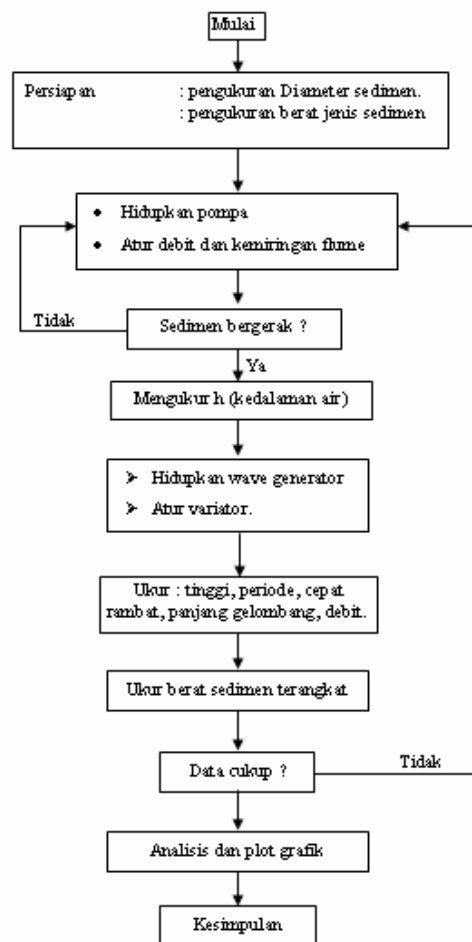
Analisis data dilakukan setelah pengukuran:  $h, q, I$  dan dihitung  $U, \tau_0$  dan  $f$ . Sedangkan dari data gelombang:  $L, H, T$ , dan  $C$  dipakai untuk menghitung:  $f_{cw}$ .

Berdasarkan analisis di atas dapat dihitung  $f_{cw}$  parameter tak berdimensi (*parameter Shields*) yang merupakan fungsi dari kecepatan, faktor gesekan, berat jenis dan diameter butiran sedimen.

Analisis sedimen transport dilakukan dengan cara membandingkan hasil hitungan menurut Madsen dan Grant dengan hasil pengukuran di dalam flume.

Hasil analisis dalam bentuk transportasi parameter dan *flow parameter* dapat diplot untuk membuat grafik tak berdimensi yang berlaku umum untuk menghitung volume angkutan sedimen pada berbagai macam kondisi aliran.

Plot kedua parameter formula Madsen dan Grant[3] dengan cara membandingkan kecenderungan dari kedua grafik digunakan seperti bagan alir Gambar 2.



Gambar 2. Bagan alir penelitian

#### 4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN.

Bahan uji penelitian ini menggunakan sampel sedimen A dan B yang lolos saringan 0.85 mm dan tertahan saringan 0.425 mm. sedimen C dan D lolos saringan 0.425 mm dan tertahan 0.30 mm, sedimen E dan F yang lolos saringan 0.30 mm dan tertahan 0.18 mm.

Setelah dilakukan uji berat jenis di dapat berat jenis rerata = 2.637 gr/cm<sup>2</sup>.

Sedimen transportasi dari pengamatan, pengukuran dilakukan penimbangan sedimen yang tertangkap *trap* dan di ukur H, T, dan C gelombang. Laju *sediment transport* setiap satuan lebar dan setiap satuan waktu (Qs) dihitung sesuai teori Madsen dan Grant dan dibandingkan dengan dari hasil pengukuran. Faktor gesekan yang dipakai teori Jonsson[4] dan Tanaka-Shuto[5].

Verifikasi dilakukan dengan memplot parameter Shields dan intensitas *sediment transport* hasil penelitian kedalam grafik Madsen dan Grant (Gambar 3) garis regresi yang di dapat dari pengukuran adalah :

$$\Phi = 0,1031 \Psi^{2,1565} \quad (20)$$

dimana diperoleh R<sup>2</sup> = 0,4979

Sedang garis yang lain sesuai Tanaka-Shuto (Gambar 4) adalah sebagai berikut:

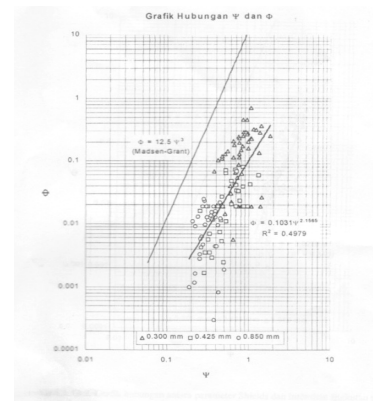
$$\phi = 0,0209 \psi^{3,0831} \quad (21)$$

dimana diperoleh R<sup>2</sup> = 0,5507

Menurut kedua grafik tersebut dapat diketahui bahwa sesuai Tanaka-Shuto hasilnya lebih baik / mendekati Madsen dan Grant, dengan demikian lebih cocok untuk penelitian ini.

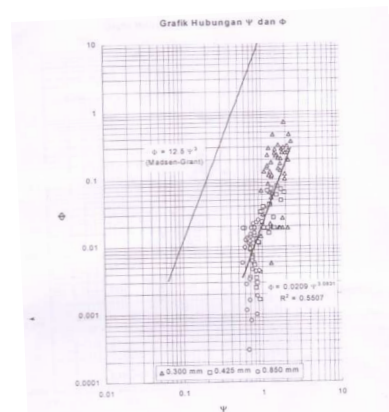
Intensitas sedimen transport ( $\phi$ ) sesuai Madsen dan Grant dinyatakan dalam bentuk bilangan tak berdimensi dengan menormalkan laju sedimen transport (Qs), W dan D.menjadi Q\*.

Hasil penelitian:plotting hubungan antara  $\phi^*$  dan  $\psi^*$ , serta persamaan regresinya dapat di periksa pada Gambar 5 dan dengan membandingkan Gambar 3 sampai Gambar 6 dapat diketahui bahwa modifikasi grafik dengan menggunakan  $\psi^*$  memberikan kecenderungan sebagai data yang lebih baik bila dibandingkan  $\psi$ . Hal ini dapat diketahui dari nilai indeks determinasi (R<sup>2</sup>) pada Gambar 6.

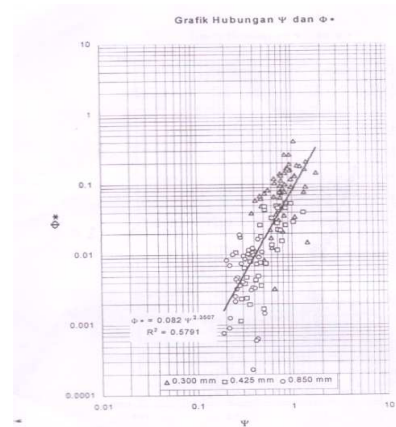


Gambar 4.1. Grafik hubungan antara parameter Shields dan intensitas angkutan sedimen dengan faktor gesekan menurut Jonsson (1966)

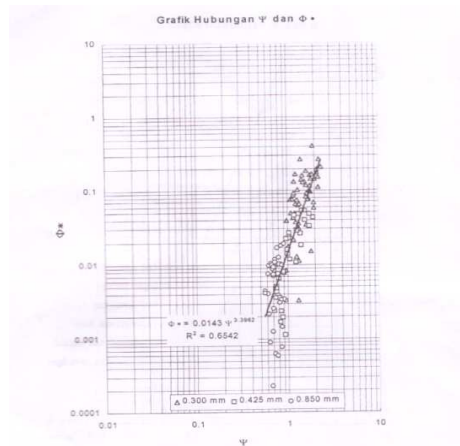
Gambar 3. Hubungan antara parameter shield dan intensitas angkutan sedimen dengan faktor gesekan menurut Jonsson (1966)



Gambar 4. Hubungan antara parameter shield dan intensitas angkutan sedimen dengan faktor gesekan menurut Tanaka dan Shuto (1981)



Gambar 5. Modifikasi hubungan antara parameter shield dan intensitas angkutan sedimen dengan faktor gesekan menurut Jonsson (1966)



Gambar 6. Modifikasi hubungan antara parameter Shield dan intensitas angkutan sedimen dengan faktor gesekan menurut Tanaka dan Shuto (1981)

## 5. SIMPULAN

Hasil penelitian ini didapatkan kesimpulan antara lain:

- Formula *sediment transport* pada aliran osilasi murni Madsen dan Grant [3] dapat dipakai sebagai pedoman penelitian oleh pengaruh kombinasi aliran searah dan gelombang. Hal ini ditunjukkan plot hasil penelitian memiliki kecenderungan sebaran data yang sama.
- Semua plot hasil penelitian berada di bawah grafik Madsen dan Grant, berarti bahwa bahan uji mempunyai tegangan geser lebih besar di banding bahan uji Madsen dan Grant.
- Faktor gesekan dari Tanaka-Shuto[5] memberikan hasil plot lebih sesuai dengan grafik Madsen dan Grant, dibanding yang menggunakan teori Jonsson[4].

- Modifikasi formula Madsen dan Grant, yang dikembangkan dalam penelitian ini memberikan ketelitian lebih baik untuk menghitung sedimen transport oleh pengaruh aliran searah dan gelombang.

## 6. REKOMENDASI

Untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan untuk sedimen yang tidak seragam, juga dapat dilaksanakan penelitian yang lebih cermat dengan peralatan yang memadai sebagai perifikasi.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Horikawa, K., 1998. "Nearshore Dynamics and Coastal Processes". Uni of Tokyo Press.
- [2] Bagnold, R.A. 1963. "Mechanics of marine sedimentation". The Sea (ed By M.N. Hill), Vol. 3, Interscience, New York, pp. 507-528.
- [3] Madsen, O.S and Grant, W.D. 1976. "Sediment Transport in the Coastal Environment". M.I.T Ralph M. Parson Lab. Report 209.
- [4] Jonsson, I.G. 1966, "Wave boundary layer and friction factors", *Proc. 10<sup>th</sup> Coastal Engineering Conference*, ASCE, pp. 127-148.
- [5] Tanaka, H and Shuto N., 1981. "Friction coefficient for a wave-current coexistent system", *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 24, pp. 105-128.
- [6] Chow, V.T. 1959. "Open Channel Hydraulics". Mc Graw Hill, Inc., New York
- [7] Triatmojo, B., 1999. "Teknik Pantai", Beta Offset, Yogyakarta.
- [8] Nizam, 1994. "Proses Kepantaian bagian I", Program Pasca Sarjana UGM, Yogyakarta.